一种基于数据聚合的传感器网络可调模型

马东超 孙兴国 马 礼

(北方工业大学计算机学院 北京 100144)

摘 要 该文主要面向上行汇聚流量为主的传感器网络应用场景,针对现有优化方案在灵活性和计算开销等方面 的问题进行了分析,包括优化目标单一、节能方法对于多重寿命标准难以适应、计算复杂度与求解近似比难以取 舍、环境突变或管理需求的调整无法快速响应等等,对当前流行的传感器硬件进行了数据收发的功耗测试后,根据 其射频耗能特性,以提高网络可靠性的最小化"最大链路利用率"和单纯功耗优化的最小化"网络连通支配集"为优 化目标,引入加权绿色因子,建立了功耗和性能可以调节的模型 RES-WSN(Reliability and Energy Steerable WSN).该模型的求解复杂度较低,当网络有数百个节点时,问题依然可以较快求解,为传感器网络提供了一种在能 量消耗和可靠性及多重寿命准则间柔性调节的方案.根据该文方案求得的路由关系和数据流传输的分配结果,以 "Multiple Instances"的思路和拓展选项的方式在 RPL 路由协议的基础上给出了部署方案.通过实验验证,该文模 型对网络的可靠性的调控比例最高为 52.08%,对能量消耗的调控比例最高为 60.51%,特别是在仅考虑节能优化 且允许部分节点死亡的情况下,网络存活时间相比只考虑可靠性的情况延长了 42.54%,与近期相关研究"MinST" 模型相比延长了 9.23%~15.38%.

关键词 无线传感器网络;节能路由协议;网络节能优化;流量工程;网络生命周期 中图法分类号 TP393 **DOI号** 10.11897/SP.J.1016.2019.00437

A Regulatable Model Based on Data Aggregation in WSN

MA Dong-Chao SUN Xing-Guo MA Li (School of Computer Science, North China University of Technology, Beijing 100144)

Abstract Because sensor nodes are usually powered by battery and limited in electricity, how to extend the life of nodes and the entire network is an important issue for network deployers and academics. The energy saving research of WSN is involved in all layers of the network, such as dynamic voltage scaling in hardware layer, efficient coding in link layer, reliable opportunity routing in network layer, wavelet data compression in application layer, and some also require cross layer collaboration. Focusing on the scenario of uplink traffic aggregation in the WSN, the problems of flexibility and computing overhead in existed optimization schemes are analyzed. They are, but not limited to, the singularity of purpose, the diversity of network lifetime standards and the adaptability of energy saving approaches, the tradeoff between computational complexity and accuracy, and the delayed response to the changes of environment or requirement. In this paper, the power consumption is measured of data transmit-receive on popular sensor hardware. Then, a green factor is defined in order to propose a reliability & energy adjustable model called RES-WSN according to the RF energy characteristics. The RES-WSN model considers two mainly optimization objects, minimizing the MLU (maximum link utilization) and minimizing the connected dominating set. The former controls reliability and the latter contributes to energy

收稿日期:2017-06-25;在线出版日期:2017-12-20.本课题得到国家自然科学基金(61300171)、北京市自然科学基金(4172019)、北京市自 然科学基金委员会和教育委员会联合会(KZ201810009011)、北方工业大学科技创新项目(18XN053)资助.**马东超**,男,1980年生,博士, 副教授,主要研究方向为WSN、下一代互联网、嵌入式系统. E-mail: madongchao1980@wo. cn.**孙兴国**,男,1991年生,硕士研究生,主要 研究方向为无线传感器网络.**马**礼,男,1968年生,博士,教授,主要从事无线传感器网络、物联网和高性能计算方向的研究.

saving. The model can quickly solve the problem with medium scale network over hundreds of nodes by relative low computation complexity. To the computation results of connection topology and traffic assignment, a new deployment scheme is established in the fashion of multi-instance ideas and the expansion of DIO options based on the RPL protocol but leads to small degrees of extension. The expansion requirements for the RPL protocol are mainly based on two aspects. First, the implementation of traffic allocation, and then the acquisition and maintenance of a small number of father nodes that may occur. In view of the above requirements, this paper adopts "multi-instance" method, which accords with the guiding principle of RPL protocol. The experimental results prove that scale of the reliability in the RES-WSN can be expanded to 52.08%, the energy consumption 60.51%. Especially, under extreme energy saving cases, the network lifetime is 42.54 % longer than the reliability optimization cases and 9.23 % -15.38 %longer than the model called MinST from a similar study. Further more, three typical scenarios were selected for real node experiments, that is, power consumption, green factor impact and system lifetime. The true experiments use 31 real nodes, one is Sink and the other 30 is common nodes. Every node hardware is the mini-system of TI (Texas Instruments) CC2530. The code of hibernation control is revised and information acquisition part is adding for the suitability. The system energy consumption of the maximum case was only 52.5% of the high reliability, which was similar to the simulation results. When the green factor is minimum and some nodes are allowed to die, the network lifetime of RES-WSN is 15.38% longer than MinST, which is more significant than the simulation experiment (9.23%).

Keywords wireless sensor networks; energy efficient routing protocol; network energy saving optimization; traffic engineering; network life cycle

1 引 言

近年来,无线传感器网络(Wireless Sensor Networks,WSN)的发展较快,在多方面表现出显著的应用价值.2012年,国际互联网工程任务组发布了WSN方面的协议标准RFC6550^[1],该文件将应用场景分为点对点(P2P)、单点对多点(P2MP)、多点对单点(MP2P)三种典型类型.传感器网络多应用在注重信息采集的领域,如救灾、军事等,所以在WSN应用中占主导地位的是集聚型多点到单点的流量.

因为 WSN 的节点一般无法以稳定的电源供 电,存储电量较少,如何提高节点及 WSN 的存活时 间是网络使用者和研究人员关心的重点.图 1 展示 了近年来在该方面的主要研究成果.从图 1 可以看 出延长 WSN 网络寿命的研究涉及传感器网络的各 个层面,有些研究甚至要多个层面协同工作.该领域 的相关研究通过使用的技术手段不同可分为节约能 耗、无线充电、外界能量收集三大类.节能技术延长 节点寿命的主要方法是通过减少其单位时间或单位 工作量的能量消耗.节能技术通常也有一定的代价, 如可能会增加网络延迟,降低信息采集频率,降低网 络的鲁棒性等.但是,在一些紧急状况和特殊环境 下,如预防森林火灾、灾害救援^[2]、监测火山活动^[3] 等,对传感器网的性能有较高的要求,特别是在对网 络的可靠性方面.因此对传感器网络路由层面提出 了一定的弹性需求,即可以在功耗和性能这两者中 进行调整和选择.除此之外,传感器网络领域针对寿 命准则的定义在不同应用场景也有很大差别^[4],各 种准则下的寿命优化方案也各不相同,因此,不可能 仅通过降低单一节点的能量消耗来解决整个网络的 能耗问题.

本文针对上述需求提出了一种 WSN 组网模型,该模型基于最优化理论,通过调整拓扑和分配流量来进行优化,并且可近似变换为凸优化模型,计算复杂度不高.同时,本文还给出基于 RPL 路由协议^[1]的部署方法及实现;第2节进行 WSN 节能方面的研究现状及局限性分析;第3节提出在能量消耗和可靠性间柔性调节的模型 RES-WSN;第4节





图 1 传感器网络生命期延长技术概况

给出基于 RPL 的部署方案;第5节通过实验对比分 析多个模型的实际效果.

2 相关工作与问题分析

近几年,WSN 网络层的节能和流量分配问题 受到了广泛的关注,但是 WSN 应用场景复杂多样, 各方法仍然存在适应性不足的情况.

WSN 网络层的节能和流量分配研究根据所用 技术的不同可分为节能路由和黑洞规避等(仅考虑 根节点不可移动的情况),如表1所示.其中,黑洞规 避方法的大体思路是通过减少高频转发节点的转发 量,或者提前增加高频转发区域内节点的数量来避 免产生能量空洞. 详细策略分析如下: Liu 等人^[23]针 对 WSN 研究中常见的六边形分簇的簇头节点黑洞 现象,提出了一种新的混合压缩感知方法,使用数据 压缩方法减少内层转发数据频繁的簇头节点的能量 消耗,降低能量空洞产生的可能,进而增加整个网络 的存活时间.但是该方法只有在分簇比较密集,簇头 节点的个数较多时优化效果明显,同时该策略没有 对簇头能量耗尽后替换该节点的过程中产生的拓扑 动荡提出优化方法;Liu 等人^[24]合理的分析了网络 中节点的需求和各种参数,以此对网络中的高频转 发区域及能量空洞高发区域进行预估,之后使用"内 密外疏"等方法对节点进行部署,以此来降低出现能 量空洞的概率,可是该策略对传感器节点的部署条 件要求很高,且该策略没有考虑数据的聚合,不一定 适用于多种网络寿命准则.相同类型的研究还包括 Halder 等人^[25]以节点密度作为参数建立了密度函 数,并在此基础上提出了节点分布策略等.节能路由 和节点调度类策略的大体思路有以下几种,通过调 整拓扑让某些节点处于睡眠模式;通过调整数据传 输路径将数据尽可能多的分配到能量相对较多的节 点进行上传[26];又如在分簇的无线传感器网络中, 在簇头等数据聚合节点使用数据均摊算法等[27-28] 来节省能量.具体策略分析如下:Imon 和 Khan 等 人^[29]针对基于数据采集树的无线传感器网络,提出 一种负载均衡的随机转换算法,使数据汇集树逐渐 平衡,以此延长网络存活时间,但在某些拓扑结构 下,该方法的优化效果很差,计算时间显著增加,同 时这个方法仅对首个节点能量耗尽前的存活时间有 较好的表现,但是对其余网络寿命准则适应度不足, 相似的优化方案还有 Laouid 等人^[30]使用蚁群算法 的流量均衡策略等; Hu 等人[31] 针对 WSN 中运动 目标跟踪场景下的节能问题,把节点的调度休眠问 题转化为子集选择问题,该算法使用能量平衡标准 来选择簇头和睡眠节点的子集以延长 WSN 网络的 寿命.然而该策略仅围绕"单目标跟踪"场景目以"跟 踪精度"为约束,优化适用范围小,同时也存在使用 单一寿命准则(首节点死亡)的局限性;Abdullah 和 Lokman 等人^[32]结合功率自适应和睡眠唤醒机制相 结合提出了一种任务感知策略,使节点可以分区域 和分任务的高效工作,但是该协议只验证了在小规

表 1 相关研究简要汇总表

方法分类	建模原则	主要不足
能量空洞 避免类	基于密度控制的数据传输 算法 ^[11]	 1. 仅仅以能量均衡为 目标,不能兼顾网 络可靠性等方面. 2. 节点逐渐死亡过程 中加何优化会网表
	能量消耗均衡优化 模型 ^[23,33-34]	
	异构节点部署策略[24-25,35]	命并未充分研究.
节能路由及 调度类	多种节点调度休眠 算法 ^[9,29-30,32,36]	 1. 单纯节能,无法兼 顾可靠性等方面.
	簇头能量均衡调度[27-28]	 2. 部分昇法需要启友 式求解,近似比和 复杂度较难取全。
	基于剩余能量的流量分配 路由策略 ^[26]	 3. 对于多重寿命标准 的适应性不足.

模网络中的效果,对于中等以上(≥100)规模的网络 效果没有进行验证.

以上研究从均衡能耗、睡眠调度、调整拓扑等角 度来提高WSN的寿命,但仍存在不足之处.黑洞规 避方法仅针对剩余电量的均匀消耗,并未考虑在节 点分布满足"内密外疏"特征时,且能容忍部分节点 死亡的前提下,如何依靠路由和数据转发的优化延 长网络寿命.节能路由和节点调度类型的研究者们 已经意识到依靠节点轮番休眠调度(类似"倒班"机 制)可以显著延长网络寿命^[36],但忽视了网络在某 些突发情况下应该兼顾性能和节能并进行灵活调 节.上述局限性可概括为如下两点:第一,对多重寿 命准则的适应性不足^[4];第二,对不同应用场景的灵 活性不足,如无法对可靠性和寿命指标可调可控.

此处通过分析实验所得数据,提出解决上述 问题的大体思路.本文使用专业的功耗追踪仪器 (Monsoon Power Monitor FTA22J/D)对广泛应用 的 TI CC2530 模块收发数据的功耗进行了追踪测 试,结果如图 2 所示.根据实验数据可以得到以下 结论:发送和接收1字节或128字节(满帧)数据的 设备能耗大体相同,设备发送数据消耗能量约为 32 mA× 2.5 ms,接收数据消耗的能量约为32 mA× 1.5 ms,接收是发送能耗的0.6 倍.根据测试多种不 同数据长度的报文的收发情况,总结出功耗和数据 长度的近似对应公式:

发送: $J_s = 3.3 \times 32.5 \times 2.5n$ (单位: 焦耳×10⁻⁶),

$$n = \left\lceil \frac{l}{85} \right\rceil,$$

接收: J_r=3.3×32.5×1.5n(单位同上), *l* 为数据 长度.



图 2 Monsoon 高精度功耗仪实测 TI CC2530 数据收发

上述情况表明,无论接收或发送,消耗的能量和 数据的长短没有直接关系,只和报文数量(数据过长 导致的分片数)有关系.这是各类要素共同影响的结 果,例如设备从 Sleep → Wake → TX/RX 的转换时 间[37]、收发数据后的小段空闲时间、确认等待的延 迟等,收发数据真正用时较短,这是造成上述结果的 原因.根据传感器节点的功耗特性,在数据汇集型的 传感器网络中在传感器节点间加入流量汇聚和同步 机制^[38],也就是任意节点收集齐自身一跳内的直连 下游节点的数据之后,再上交到其父节点就可以明 显降低能量消耗,对于一跳以外的孙子节点的数据 则无需聚合,此方式比文献[38]的轻量级聚合方式 更加简单,且不会引入显著时延.在此思路指导下, 节能目标对于网络拓扑组建的诉求是最大化叶子节 点数目,也即最小化联通支配集,使数据可以有更多 的机会聚合后再传输.

研究动机 1. 根据以上实验所得数据及数据剖 析结果可以发现,节能需求希望叶子节点尽可能的 多,使流量聚合的可能大大增加.在典型的网络资源 优化中可靠性最终目标是使"最大带宽占用"尽可能 的小,使数据平均分配在所有分支上,降低拓扑急剧 变化的可能,可减少路由收敛过程产生的流量损失, 使网络的可靠性得到提高^[39].由此看来,可靠性和 节能这两个优化方向有矛盾,因此需要研究一种可 对这两者进行调节的策略.

研究动机 2. 根据"On the lifetime of wireless sensor networks"^[4]一文的 2.7 节可以看出,在无线 传感器网络研究中针对各种使用场合的寿命准则有 15种左右,这些定义中 n-of-n 是占主流地位的大 类,该大类又分为以首个节点死亡[38,40](下文称为 准则1)、死亡或脱网的节点达到一定比例[41](下文 称为准则 2)两类,作为 WSN 网络寿命终结的标志. 如 Dietric 和 Hellman 文中所述^[4,41],准则 1 主要应 用在每个节点都至关重要的场合,任意节点的死亡 都无法容忍;准则2则主要应用在节点数量多、冗余 度好或者一定数量节点死亡可容忍的场合.这2类 应用场景的特点和需求都不同,导致了网络寿命优 化方式的不同,甚至截然相反.例如,准则1追求流 量均匀分配,而准则2则追求流量尽可能的汇聚.值 得大家关注的是,可靠性和节能目标与准则1、2 恰 好对应,都是通过调整拓扑和流量分配来优化.所以 需要一种普适且可调的方法来解决.

下文将通过两个实例说明在相同的拓扑和采样 周期下,网络的可靠性和不同准则的寿命在不同的 路径选择方法和流量分派方法下差别较大.由图 3

440

(a)所示,每个节点在单个周期内会完成数据的采 集、上传工作,数据量为每周期 10 个单位. 网络开始 运行时所有节点的能量为 26 个单位. 该网络共有 3 层(含 Sink),各层节点仅可以与其上下两层节点 进行通信(最下层的节点只能跟其上层节点通信). 为方便计算,设定节点单次接收会消耗 0.6 个单位 电量;单次发送会消耗 1 个单位电量. 这里按照简单 的流量汇聚机制^[38]来计算节点能耗,如图 3 例 1 中 节点 2,该节点将接收的两个子节点(3 号和 4 号节 点)的数据一次性上传,接收两次和发送两次(包含 该节点自己所采集数据的一次上传),所以 1 个周期 该节点消耗能量是 3.2 个单位. 这里为网络设置两 种寿命准则^[4]:首个节点能量耗尽和整个网络一半



图 3 路由和流量分配的网络能耗影响示意图

节点能量耗尽或脱离网络.

情况 1. 只探讨"最大链路带宽利用率"的最小 化,同时也是寿命准则 1 的最大化目标,目的是减少 单点故障出现的可能性同时降低流量损失.根据 图 3(a)情况 1 所示,相同层次的节点都发送相同数 量的数据,网络结构对称,任意节点死亡,产生的流 量损失很小,整个网络较健壮.但是,由于子节点均 匀分布,整个流量汇聚传输很少,系统能耗较大.同 时缺乏节点调度^[35],经历 10 个采集周期后第二层 节点的电量殆尽,准则 1 和准则 2 的寿命均终结.

情况 2. 仅考虑准则 2 的网络寿命. 在该标准下,根据叶子节点数目最多形式进行拓扑调整. 缺点是当枢纽节点死亡时会造成很大的数据损失,如 图 3(a)情况 2 中的 2 号节点,该节点死亡会使得下游的两个子节点与网络的通信中断. 经历 8 次采集周期后 2 号节点死亡,其两个子节点改将 1 号节点作为上游节点,网络继续工作. 再次经历 5 次采集周期后 1 号节点死亡. 至此,准则 1 的寿命为 8 周期短于情况 1,但是准则 2 的寿命为 13 周期长于情况 1.

下面考虑增多节点数量及不同初始电量的 情况——示例 2,见图 3(b),该示例仍然考虑了能耗 均衡(情况1)和叶子节点数量最大化(情况2)两种 情况.并目,为规避能量空洞,距离根节点更近的节 点给予更多的初始能量.以寿命准则1衡量,情况1 的 WSN 运行 14 个周期后 1 号和 2 号节点能量同 时耗尽网络寿命终结;情况2网络工作10个周期后 节点1成为第一个耗尽的节点,网络寿命终结.但根 据寿命准则2来看,情况1工作14个周期后寿命终 结;情况2当节点1死亡后,其子节点可连接到5号 节点上继续工作7个周期,5号节点死亡网络寿命 终结,总寿命为17个周期长于情况1的14个周期. 在初始电量不同的情况下,这两种情形和图 3(a)中 两种情形出现了相似的寿命情况,而且图 3(b)下图 中一旦1号节点或5号节点(10个周期后)死亡,通 信损失较大.

由上可见,在传感器数量、电量以及节点部署方 式等方面的同等条件下,路由策略能够对数据通信 的可靠性和调整多重准则的网络寿命方面产生迥异 的效果.因此,后文提出了一套最优化模型,能够支 持以绿色因子作为可调参数,在计算开销较小的基 础上,面对多种需求场景时,该模型可较快调整网络 拓扑,进行流量分配.并且,该模型只有很好的适用 于 RPL 协议,才可以在传感器网络中应对各种紧急 状况,应用在各种各样的环境中.

3 可靠性与功耗可调的WSN理论模型

本节提出了一种可靠性与功耗可调的最优化理 论模型 RES-WSN,围绕上文两个研究动机所述的 多个目标进行优化.建立的 RES-WSN 模型通过近 似变换可转化为凸优化模型,在模型中通过绿色因子 参数在不同目标间进行调节.相关变量信息见表 2.

表 2 变量描述

参数	含义		
Ν	节点集		
E	边集		
n	节点总数		
е	周期性采集频率(字节/分钟)		
C_j	最大收发链路容量		
x_{ij}	节点 <i>i</i> 到节点 <i>j</i> 的流量(<i>i</i> , <i>j</i> 为相邻节点)		

首先给出约束条件如下:

$$\sum_{\epsilon \in \epsilon} x_{ij} \leq c_j \tag{1a}$$

$$x_{ij} \ge 0$$
 (1b)

$$\sum_{j \in \varepsilon} x_{ij} > 0 \tag{1c}$$

$$\sum_{j \in \epsilon} x_{sj} - \sum_{i \in \epsilon} x_{is} = d_s, \ d_s \ge 0$$
(2)

$$\sum_{j \in \varepsilon} \operatorname{sgn}(x_{ji}) \le v, \ \operatorname{sgn}(w) = \begin{cases} 1, \ w \ge 0\\ 0, \ w = 0 \end{cases}$$
(3)

式(1a) 是节点流量负担约束,即任意节点所 带全部下游节点的汇聚流量总和小于链路容量; 式(1b)表示相邻节点间流量非负;式(1c)表示每个 节点都至少有 1 个父节点.如果存在对于所有的节 点 $x_{ij}(i,j \in N)$ 满足以上约束,则该流量矩阵 x 是一 个可行的结果.式(2)表示在 WSN 中任意节点(不 包含 Sink)s 发送给上游节点的数据和该节点从其 下游接收的数据之差(d_s)是 s 节点自己采集的数 据.若 s 是 Sink 则只是汇集了 WSN 全部的数据但 自身并不产生数据,所以 $d_{Sink} = -e \times k$; 而 $d_s = e$,其 中 s 为非 Sink 节点.式(3)限定了每个节点的"儿子" 节点个数最多为 v 个.优化目标表达式为

Minimize $\left[a \cdot \max \frac{\sum_{i \in \varepsilon} x_{ij}}{c_j} + b \cdot \|\sum_{i \in \varepsilon} \operatorname{sgn}(x_{ij})\|_{0}\right]$ (4) 满足(1a)~(1c),(2),(3)

式(4)的左项是针对网络可靠性的优化,参考了 流量工程中 MLU 最小化诉求,使节点的总接收流 量均匀分摊,左侧子式不仅表示对整个网络的可靠 性优化,还表示对研究动机二中网络寿命准则1的 优化.右侧表示对网络寿命准则2和节能的优化. $\sum_{i \in \epsilon} \operatorname{sgn}(x_{ij}) 表示 j 号节点直接相连的下游节点的数$ 量, ||f||。表示 f(f为向量/矩阵)中不为零的数据的数目.这和稀疏采样理论中最小化||f||。(基数最小 $化)问题很相近^[42]. ||<math>\sum_{i \in \epsilon} \operatorname{sgn}(x_{ij})$ ||。表示所有儿子节 点的数量不为零的节点的数目,即中间节点的数量. 该子式的思想是使网络拓扑中中间节点的数量尽量 少,这样自然流量就相对集中,使得图 3 中各节点之 间数据聚合的可能增加,而且参考了相关研究中节 点的睡眠唤醒轮流调度策略. 总而言之,右子式的诉 求是使网络中叶节点数目最多,在上文提到的"内密 外疏"节点分布基础上,"数据聚合"、"前仆后继^[34]" 的工作方式可以使准则 2 的网络存活时间最长. 式(4)的优化目标为这两个子式的加权求和,其中 a,b是可变权值,同时设绿色因子为 a/b的值,这是 运营者的调节手段.

优化目标式(4)的右子式显然是非凸的,需要近 似变换.显然,右子式 $\left\|\sum_{i \in \varepsilon} \operatorname{sgn}(x_{ij})\right\|_{0}$ 与 $\left\|\sum_{i \in \varepsilon} x_{ij}\right\|_{0}$ 两 式可作等价替换. 但是, $\left\|\sum_{x_{ij}}\right\|_{0}$ 仍然无法求解. 此 0范式可以依据稀疏采样理论中的 RIP(受限等距 属性)准则[42] 变为1范式,之后可转化为线性约束 条件进行求解,但是又很难判断本模型是否满足 RIP 等距条件^[43]. 著名的凸优化理论专家 Stephen 在该类 0 范式的求解方面取得了重大进展[44],基本 思路是在求解过程中加入松弛变量ω,把所求模型 的几何特征转化成文献[44]中图1所示情况,也就 是转化模型的等高面为"窄高"状,这样可以防止 产生与约束直线或平面相切的非稀疏解,求得准确 的稀疏解. 总之,本文借鉴上述方法把 $\left\|\sum_{i \in s} x_{ij}\right\|_{0}$ 转 化为 $\sum \left(\sum \omega_{ji} x_{ji} \right)$,同时可以采用文献[44]的 2.2节的迭代算法进行求解.此外,对约束条件 式(3)进行简化处理,方法是在求解前进行初始化 时,针对任意节点 i 将距离其最近的 h (h 为常数,一 般取 3~8) 个节点之外的其他节点的 x_{ii} 初始化为 零. 至此, RES-WSN 模型转化为凸优化模型:

Minimize
$$\left(a \cdot \max \frac{\sum_{i \in \varepsilon} x_{ij}}{c_j} + b \cdot \sum_{i \in \varepsilon} \left(\sum_{j \in \varepsilon} \omega_{ji} x_{ji}\right)\right)$$
 (5)

满足(1a)~(1c),(2)

显而易见,式(5)已化为凸优化,较易求解.可 是,在使用数学软件如 MATLAB等进行计算时,左 侧的"最大问题最小化"将其转变为线性约束条件, 才更容易计算,模型转化如下:

$$\begin{aligned}
&\text{Minimize} \left[a \cdot \frac{\sum_{i \in \varepsilon} x_{ij_k}}{c_j} + b \cdot \sum_{i \in \varepsilon} \left(\sum_{j \in \varepsilon} \omega_{ji} x_{ji} \right) \right] (6) \\
&\text{满足(1a)} \sim (1c), (2) \\
&\sum_{i \in \varepsilon} x_{ij_k} \ge \sum_{i \in \varepsilon} x_{ij} (j_k \neq j) \\
&\text{L式(6)已转换为若干线性规划问题,且有:}
\end{aligned}$$

定理 1. 式(6)的全局最小值与式(5)的全局 最小值等价.

证明. 设 x^* 为式(6)的全局最小值,在 $j=j_k$ 时取得,则

$$a \cdot \frac{\sum_{i \in \varepsilon} x_{ij_k}}{c_j} + b \cdot \sum_{i \in \varepsilon} \left(\sum_{j \in \varepsilon} \omega_{ji} x_{ji} \right) \ge a \cdot \frac{\sum_{i \in \varepsilon} x_{ij_k}^*}{c_j} + b \cdot \sum_{i \in \varepsilon} \left(\sum_{j \in \varepsilon} \omega_{ji} x_{ji}^* \right).$$

由式(7)可得:

$$a \cdot \frac{\sum_{i \in \epsilon} x_{ij_k}}{c_j} + b \cdot \sum_{i \in \epsilon} \left(\sum_{j \in \epsilon} \omega_{ji} x_{ji} \right) \ge a \cdot \frac{\sum_{i \in \epsilon} x_{ij}}{c_j} + b \cdot \sum_{i \in \epsilon} \left(\sum_{j \in \epsilon} \omega_{ji} x_{ji} \right).$$

综上:

$$a \cdot \max \frac{\sum_{i \in \varepsilon} x_{ij}}{c_j} + b \cdot \sum_{i \in \varepsilon} \left(\sum_{j \in \varepsilon} \omega_{ji} x_{ji} \right) =$$

$$a \cdot \frac{\sum_{i \in \varepsilon} x_{ij_k}}{c_j} + b \cdot \sum_{i \in \varepsilon} \left(\sum_{j \in \varepsilon} \omega_{ji} x_{ji} \right) \ge$$

$$a \cdot \frac{\sum_{i \in \varepsilon} x_{ij_k}^*}{c_j} + b \cdot \sum_{i \in \varepsilon} \left(\sum_{j \in \varepsilon} \omega_{ji} x_{ji}^* \right) =$$

$$a \cdot \max \frac{\sum_{i \in \varepsilon} x_{ij}^*}{c_j} + b \cdot \sum_{i \in \varepsilon} \left(\sum_{j \in \varepsilon} \omega_{ji} x_{ji}^* \right).$$

证毕.

在求解转化问题(式(6))的过程中,直接求解 n 个线性规划问题计算量较大.考虑引入判别条件提 前终止计算可简化运算量.下面基于函数连续性的 性质给出如下定理.

定理 2. 当 $j = j_k$, 有 $x_{ij_k}^*$ 为第 k 个转化问题的 最优解, 令集合 $H = \left\{ \frac{\sum_{i \in \varepsilon} x_{ij}^*}{c_j} = \frac{\sum_{i \in \varepsilon} x_{ij_k}^*}{c_{j_k}}, j \neq j_k \right\}$, 则

(1) 如果集合 H 为空集, x^{*}_{ij}, 为原问题的最优解.

(2) 如果集合 H 非空,对所有 $j \neq j_k$ 时转化问题 的最优值均大于等于 $j = j_k$ 时的最优值,则 $x_{ij_k}^*$ 也为 原问题的最优解.

证明. (1)当 *H* 为空时,转化问题取得最优解 是在 *x*^{*}_{ij_k}处:

$$a \cdot \frac{\sum_{i \in \varepsilon} x_{ij_k}^*}{c_{j_k}} + b \cdot \sum_{i \in \varepsilon} \left(\sum_{j \in \varepsilon} \omega_{ji} x_{ji}^* \right) >$$
$$a \cdot \frac{\sum_{i \in \varepsilon} x_{ij_k}^*}{c_j} + b \cdot \sum_{i \in \varepsilon} \left(\sum_{j \in \varepsilon} \omega_{ji} x_{ji}^* \right).$$

由目标函数的连续性可知,在 x^{*}_{ij}, 的邻域内有:

$$a \cdot \frac{\sum\limits_{i \in \varepsilon} x_{ij_k}}{c_{j_k}} + b \cdot \sum\limits_{i \in \varepsilon} \big(\sum\limits_{j \in \varepsilon} \omega_{ji} x_{ji} \big) \ge \\ a \cdot \frac{\sum\limits_{i \in \varepsilon} x_{ij}}{c_j} + b \cdot \sum\limits_{i \in \varepsilon} \big(\sum\limits_{j \in \varepsilon} \omega_{ji} x_{ji} \big).$$

因此:

$$a \cdot \max \frac{\sum_{i \in \epsilon} x_{ij}}{c_j} + b \cdot \sum_{i \in \epsilon} \left(\sum_{j \in \epsilon} \omega_{ji} x_{ji} \right) =$$

$$a \cdot \frac{\sum_{i \in \epsilon} x_{ij_k}}{c_{j_k}} + b \cdot \sum_{i \in \epsilon} \left(\sum_{j \in \epsilon} \omega_{ji} x_{ji} \right) \ge$$

$$a \cdot \frac{\sum_{i \in \epsilon} x_{ij_k}^*}{c_{j_k}} + b \cdot \sum_{i \in \epsilon} \left(\sum_{j \in \epsilon} \omega_{ji} x_{ji}^* \right) =$$

$$a \cdot \max \frac{\sum_{i \in \epsilon} x_{ij}^*}{c_j} + b \cdot \sum_{i \in \epsilon} \left(\sum_{j \in \epsilon} \omega_{ji} x_{ji}^* \right).$$

由凸优化性质可知,此邻域内的局部最优解即 为全局最优解.

(2)证明方法与(1)类似,故略过. 证毕.

算法1. 利用转化问题求解原问题.

输入: a,b,c_j,d_s ,初始值 k=1

输出:原问题最优目标函数值及全部自变量 x_{ij}

- 解转化问题,若无最优解,则 k 增 1 再次求解.如果 有最优解,记为 x^{*}_{ijk}.
- 求解集合 H,如为空集,x^{*}_{ijk}即为所求最优解,终止. 如非空,继续向下进行.
- 3. 取 q 为集合 H 中的 j 并求解第 q 个转化问题.
- 4. If 问题 q 的函数值<问题 k; {令 k=q,回到步骤 1};
 else{继续比较,直到所有子问题均≥问题 k,则 x^{*}_{ijk}
 即为最优解,算法终止}.

4 基于 RPL 路由协议的部署方法

2008年,IETF 成立了 ROLL 工作组,对 AODV 等协议进行了评价,结论是均不太适用于低功耗 有损网络.该工作组随后提出了 RPL 协议.近年来, 由瑞典计算机科学院专门针对 WSN 网络开发了 Contiki OS 可完整支持此协议,此系统在工业界已 经广泛应用^[45-46].因此,本文机制也基于 RPL 协议 提出了扩展的实现方法.

本文主要面对上行汇聚应用场景,主要针对路 由的下发及执行.本文使用"Multiple Instances"方 法来完成,符合 RFC6550 文件 3.1.3 节^[1]. 如图 4 左侧示例所示,第一步,在整个网络中创建从 Sink 到各节点的路由,与 RFC6550 原有的"Instance" 相同.第二步,在拓扑建成后,通过本文方法求解 各个节点数据转发分配情况,结果在图 4 中用实 线表示. 最终通过 DIO 消息向树形网络下发流量 分配结果. 如图 4、图 5 所示, 7 号节点收到的两个 DIO 报文中"RPLInstanceID"是1和2,同时对应的 源地址是3号节点和4号节点的 IPv6 地址. 对于 节点死亡和网络变化较为显著等情况可引发再次 计算:假定变化流量阈值为 29,如图 4 中情况 1、2 均发生或 3 发生后才会引发重新计算. 某链路通 信不可用情况如图 4 右侧中的标注(1)会由原 RPL 所采用的 NUD(RFC4861) 机制获知,此时节 点 8 需要向 Sink 节点发出 NUD 通告. 具体机制流 程详见算法 2.



图 4 基于 RPL 协议的 RES-WSN 部署方案示意

1 Byte	1 Byte	1 Byte	2 Byte		
Type=0xfe	OptLenth=x	RPL Instance ID	Traffic		
Parent Address					

图 5 DIO 扩展选项"Traffic Allocation"

算法 2. 基于 RPL 协议的扩展方案流程. 输入:传感器节点坐标、数据采集频率及数据量 输出:任意相邻节点 *i、j* 之间的流量成功部署

- 各节点根据到 Sink 节点距离得到父代集合,按照:
 a. 只允许到 Sink 距离≤本节点.
 - b. 到本节点距离≤门限 R 且只取距离最近的前 h 个.
- 根据父代集,生成邻接矩阵,其中潜在父代关系对应元素置1,否则置0.
- 将上述矩阵和流量需求 d_s代入式(6)并根据算法 1 迭代求解,获得最优流量分配的全部 x_{ij}
- 网络正常运行,按原 RPL 协议组网,生成基本的上 下行路由,此路由为控制信息的通道.

- 5. Sink 将步骤 3 的结果以 DIO 协议报文发给对应节 点,各节点按此流量比例执行分摊策略.
- 如父节点死亡,子节点需将流量转给其他父节点并 通过控制信息上传通告.当 Sink 节点发现流量调整 量达到阈值,则触发再次计算.

RPL 路由协议在 Contiki OS 中的实现过程如 图 6 所示.主要对两个部分进行了修改,流量分配部 分:原"tcpip_ipv6_output"函数被"RES_output" 函数替代,实现数据流量的分摊;控制流部分:对 "dio_input"函数进行修改,新增本文选路策略.



5 实 验

本节进行仿真和真实系统实验,重点包括:(1)比 较第2节中高可靠性和低功耗(研究动机1)的参数调 整效果;(2)比较寿命准则1和准则2(研究动机2)的 参数调整效果;(3)比较本文方案与最新研究成果 MinST 方案^[38]在不同寿命准则下的结果.数据均按 照上文的简单聚合方法进行发送.仿真包含采集频 率和通信半径等部分可调参数,详细情况见表 3.仿 真过程为先通过 MATLAB 进行求解,之后将结果 输入到 NS2 中运行并统计数据及结果.

表 3 参数设置

100	J X K E	
配置含义	配置值	
节点数	200	
最大通信半径	5 m	
节点初始电量	5 Wh	
部署密度(均匀)	$0.025 \text{/}m^2$	
部署密度(非均匀,内-外)	0.127 \sim 0.014 \uparrow/m^2	
普通采集周期	1次/秒	
Sink 所在位置	圆心	
采集数据量(每次)	5 字节	
节点发送数据能耗	见第 2 节 J _s	
节点接收数据能耗	见第2节J _r	
帰命田子(𝑔/𝔥)	0~.104	

5.1 系统总能耗

本文提出的模型可以通过改变叶子节点数量来 调节网络功耗、可靠性和多重准则的网络寿命.由图7 可见,叶节点比例与绿色因子的取值有较大关系,当绿 色因子无限小时,节点间通信距离只有5m的情况下, 叶子节点所占比例也高达72.5%.正如第2节所述,当 叶子节点比例较大的情况下,在数据转发过程中就可 以汇聚流量,可以节省多次发送能耗.所以如图8(a)所



图 8 总能耗随时间变化的相关对比

示,在低功耗模式下(叶子节点数量达到极限时)网络的能量消耗只是高可靠性模式的 62.3%,同时也 是本文模型能调节的极限.

在叶节点最多的情况下,网络基本条件对低功 耗效果也有影响,如图 8(b)所示,当节点的通信半 径从 5m 增加到 15m 时,网络的能量消耗下降了约 25.5%,这是因为节点的通信距离的增加导致更多 节点可以和更靠近 Sink 的数据聚合节点通信,叶节 点的数目会再次增加,网络总的能量消耗也更小.此 外,由图可见,系统总功耗与时间成线性关系,这是 因为在仿真时只考虑了传感器节点收集的数据信息 在传输过程中产生的能量消耗,没有考虑链路层或 网络层协议的控制流信息收发所产生的能量消耗, 且能量消耗是根据第 2 节接收和发送的能量消耗关 系式所得.

5.2 绿色因子的作用

图 9~图 14 分别表示绿色因子在多种因素的 影响下对网络的平均能量消耗和多重寿命准则的影 响(准则1为首个节点能量耗尽,准则2为全网70% 的节点能量耗尽或脱网:绿色因子是式(4)中 a/b 的 值). 由图 9 可见,绿色因子越大,系统的平均功率越 高.其中系统功率变化明显的区域集中在绿色因子 取值为 0~3×10³ 区间内,这是因为当绿色因子大 于 3×10³的情况下,式(6)的右子式对网络的作用 被削弱较多.另外,随着通信半径的增大系统的功 耗逐渐降低,这是因为通信半径增大导致更多节点 可以连接到 rank 值更低的汇聚节点,转发次数减少 所致.本文模型与文献[34]中的 MinST 模型相比, 当绿色因子调整为节能目标时(5m通信半径下为 $\leq 0.4 \times 10^{3}$ 左右、10 m 通信半径下为 $\leq 0.9 \times 10^{3}$ 左 右、15m通信半径下为≤0.6×10³左右),系统的功 耗比 MinST 低 9.16% 左右. 出现这种情况是因为 MinST 追求让剩余能量多的节点多工作,没有考虑 通过增加流量聚合机会来减少网络能量消耗,因此 当 RES-WSN 模型通过调节绿色因子使网络中出 现大量数据聚合时,功耗比 MinST 方案低.

图 10 不但显示了功耗与绿色因子的关系,同时 也说明采集周期越小功率也越高.图 11 显示,"内紧 外松"分布方式跟均匀分布方式相比,网络的功率要 低约 27.5%.原因是"内紧外松"分布方式离 Sink 近的节点相对"均匀分布"方式更多,不但减少了数 据传递次数而且使叶子节点数量增多,数据汇集情 况增多.图 12 到图 14 展示了不同限制条件下绿色 因子和网络寿命的关系.可以发现随着绿色因子的 变小,叶节点的数量不断增加,准则1的网络寿命越短,数据汇集使得节点的能量消耗增加,首个节点的存活时间缩短,却使得WSN总的能量消耗进一步减少.也正是因为以上原因,网络中寿命准则2的情况则完全相反.图12所出现的现象和图9类似,当本文方案的绿色因子小于1×10³时功耗低于MinST,网络寿命(准则2)就长于MinST.







然而,根据第3节的分析可知,使得能量消耗少 的原因是叶节点的数量多,网络的数据传输产生了 大量聚合,这不但减少了网络准则1的寿命,而且也 降低了网络的可靠性.本实验对节点宕机引起的流 量损失进行了仿真.通过图15可以看出,在低能耗



图 14 多种分布疏密情况下绿色因子对网络寿命的影响



图 15 多种通信半径下绿色因子对系统可靠性的影响

模式下(绿色因子较小时),数据聚合节点突然能量 耗尽而死亡,网络在 8 秒的调整流量和拓扑的时间 里(这个时间是在 Contiki 操作系统的仿真软件 Cooja 进行实验测得的结果),流量丢失十分严重, 特别是当节点通信距离短,数据聚合节点少承载大 量外围节点数据传输工作时,损失的数据量也更多; 当节点通信距离相对较大时,很多外围节点可以和 Sink 通信成为数据聚合节点,承担部分外围节点的 数据传输工作,数据聚合节点死亡产生影响相对较 小.图 16 情况类似.

综上,通过本小节的图可知,本文模型中的绿色 因子可以在调节网络能耗和可靠性方面发挥作用, 同时会影响两个准则的寿命.当绿色因子在效果显 著区间(从 3×10³到 0)变化时,WSN 系统耗能下降 了约 34.3%;鲁棒性也下降了约 47.5%;准则 1 的 寿命下降了约 46.7%;准则 2 的寿命提高了 23.7%. 值得大家关注的是,系统总能量消耗的高低和寿命准 则1的时间长短没有直接关系,均衡网络中各节点



图 16 多种采集频率下绿色因子对系统可靠性的影响

的能量消耗是延长寿命准则1的关键因素.本文方 案在节点通信距离较大时效果更明显.

5.3 不同部署和配置方式的影响

图 17~图 19 为在不同通信距离、采样周期和 节点布局(如表 3 所示)的作用下,网络能量消耗情况 示意图.进行网络寿命准则 1 实验时取 a=1,b=0 (绿色因子);进行寿命准则 2 实验时取 a=0,b=1. 由图 17 可见,节点部署的疏密程度对功耗的影响比 例在通信半径减小的情况下逐渐减小,这是因为节 点通信距离小,即使节点密度稍大也会产生大量超 出通信距离的节点,从而使得非均匀分布对网络能 量消耗的作用降低.在图 18 中,节点使用"内紧外 松"的分布方式比使用均匀分布的方式的网络存活 时间长,这是因为非叶子节点的增加使得数据转发 时经过的中间节点减少;通过和 MinST 的横向比较 发现,均匀分布方式时两者准则 1 的寿命基本相同,而 均匀分布和非均匀分布的准则 2 的寿命 RES-WSN



图 17 通信半径和节点密度对功率的影响

方案分别高出 MinST 方案 4.5%和 9.23%. 有图 19 可见,采集频率对网络寿命的影响基本呈线性关



系,即使在节点分布密度不同时影响程度也基本

图 18 多种通信半径和节点密度下的寿命对比





图 19 采集频率及节点密度和网络寿命的关系

5.4 网络整体变化

为了展现在模型的调节过程中网络整体的变化 情况,本小节分为两种情况,一种是仅考虑可靠性 (a=1,b=0),另一种仅考虑能耗(a=0,b=1).图 20



图 20 直观变化示意图

449

展示了网络中节点的存活情况,初始电量为 40 mWh, 节点数为 100 个,节点以非均匀分布方式部署.从 图 20 中可以看出,高可靠性情况下,叶节点数量明 显小于低功耗情况,且多分布在边缘.网络在工作了 30 个小时时,无节点能量耗尽现象,可是在工作了 60 个小时后出现大范围的节点能量耗尽情况,出现 该情况是因为高可靠性情况要求数据均匀分布在网 络的各个链路上,使得节点的能量消耗基本一样.在 另一个极端情况下,叶节点在整个网络中大量存在 并广泛分布,准则 2 的网络存活时间明显增加.网络 中节点的能量耗尽是一个连续过程,网络在工作了 70 个小时后,网络中的其余节点仍然能正常通信并 工作,这是因为在低功耗情况下内层节点以近似串 行的方式承担数据转发工作,不参与转发的节点以 叶节点模式工作,准则 2 的网络寿命明显增长.

5.5 算法效率评估

本小节针对上文第3节的算法1的计算效率进 行了仿真评估,并与其它几种算法进行了对比.其 中,本文算法1具有可并行计算性质,即算法1的步 骤1采用了多机并行计算的方式一次性算出多个 值,可显著降低迭代次数.与之对比的几个算法分别 为直接单机串行求解 n 个转化问题取最小解、多机 并行直接求解 n 个转化问题取最小解、MinST 求解 算法(按文献[38]中4.3节求解算法实现).为了考 察问题规模较大时算法的性能,本文进行了 800 个 节点的较大规模问题求解实验.本实验环境为3台 双 CPU 的服务器(Intel Xeon E5-2670 2.60 GHz), 操作系统为 CentOS 6.4,运行 MATLAB R2015b 64 bit 进行求解.并行运算的实现方式为:使用 matlabpool 命令启动并行计算功能,将代码中的 For 循环改为 Parfor 关键字即可将循环体分到若干 独立处理器中并行运算.

由图 21,本文算法 1 的求解时间效率显著优于 直接串行和并行两种求解算法,稍优于 MinST 算



法,这是由于算法1的并行性和提前终止的判定 可显著节省计算时间.为了避免实验的偶然性,本文 进一步对800节点数量下进行了变更拓扑分布条件 的100次实验,以累积分布函数CDF(cumulative distribution function)为指标与其它三种算法进行了 详细对比.由图22,算法1运行时间以100%的概率 为直接串行算法运行时间的10%以下、为直接并行 算法的55%以下,为MinST求解算法的95%以下. 其中,与上述三者时间比值的数学期望分别为0.05、 0.45和0.78左右,以上结果与图21的结论相一致.



5.6 真实节点实验

本小节使用了 31 个节点进行了真实场景实验, 其中 1 个 Sink 节点和 30 个普通节点. 节点硬件配置 为 TI 的 CC2530 的最小系统,无其它外围芯片,外置 全向天线,外接 ER14505 锂电池供电,节点中烧入的 软件系统为 Z-Stack 2.5.1 和 Contiki 2.7. 对这两种 情况均进行了实验,结果无明显区别. 并且,除加入采 集数据上传部分的代码以外,还对协议栈休眠控制部 分进行了少量修改,例如对 Z-Stack 软件中的路由节 点和终端节点加入了最简单的周期性休眠机制,即无 任务就进入休眠的微功耗状态,避免不必要耗能. 图 23 为真实实验环境的节点配置,节点按层次拓扑 共计 5 层,数据的采集周期为 1s,每次采集的数据 量为 5 个字节,绿色因子的取值范围是 0~3×10³.



图 23 真实实验环境配置

本文选取了三个典型场景即功耗、绿色因子影 响和系统寿命进行真实节点实验,实验过程中轮流 并重复使用 Monsoon 高精度功耗仪监控全部节点 的平均功耗,发现约30s后各节点平均功耗会趋于 稳定.实验结果见图 24~图 26,分别对应 5.2 节的 图 8(a)、图 9 和图 12.图 24 中,低功耗情况下叶节 点最多时系统的能耗仅为高可靠性情况下能耗的 52.5%,与仿真结果相近,低功耗情况下出现了轻微 的非线性增长是由于初始阶段有较多协议交互导致 耗能;图 25、图 26 与仿真结果也基本一致,图 26 所 示的寿命实验中,假设最外层节点的初始电量设置 为10mWh,内层节点为100mWh.值得注意的是, 图 26 中在低功耗模式下(a=0,b=1 时),本文模型 准则2的网络寿命比 MinST 延长了 15.38%,比仿 真实验延长了 9.23%. 这主要是因为, 仿真实验只 考虑了理想情况下数据收发的能耗,而真实实验基 于功耗仪实测数据,包含了物理层同步前导码、等待 ACK 以及睡眠唤醒状态切换等方面的能耗. 非叶子 节点由于承担数据转发任务,状态切换更加频繁,实 测耗能自然也会更多.所以,本文方案追求叶子节点 更多的优化思路在实际使用中会带来比仿真情况下 更大的节能优势.





图 26 绿色因子在多种通信半径下对网络寿命的影响

6 结论与展望

本文针对流行的 WSN 的板卡和芯片的收发功 耗进行了实测,并根据功耗特性,在 WSN 网络层提 出并构建了一种功耗和性能可调的理论模型 RES-WSN. 该模型通过近似可转化为凸优化模型,针对 不同规模的问题都能进行求解和优化. 之后针对 RES-WSN 模型的求解给出了化简和求解方法, 并通过实验验证. 通过实验发现,本文模型对网络的 可靠性的调控比例最高为 52.08%,对能量消耗的 调控比例最高为 60.51%,尤其在仅考虑能耗时,准 则 2 的网络存活时间比仅考虑可靠性时延长了 42.54%,相比相关研究 MinST 方案网络存活时间 延长了 9.23%~15.38%.

由实验测得的接受和发送特性可见,如果可以 花费更多的计算时间和资源对路由、数据聚合和同 步等部分进行精细的控制,会使本文模型在节能部 分有更好的表现,所以接下来将在精细的流量聚合 和同步策略方面开展工作.

参考文献

- [1] Winter T, Thubert P, Hui J, et al. RPL: IPv6 routing protocol for low-power and lossy networks. RFC 6550, 2012
- [2] Khalil I M, Khreishah A, Ahmed F, Shuaib K. Dependable wireless sensor networks for reliable and secure humanitarian relief applications. Ad Hoc Networks, 2014, 13: 94-106
- [3] Werner-Allen G, Johnson J, Ruiz M, et al. Monitoring volcanic eruptions with a wireless sensor network//Proceedings of the Second European Workshop on Wireless Sensor. Istanbul, Turkey, 2005: 108-120
- [4] Dietrich I, Dressler F. On the lifetime of wireless sensor networks. ACM Transactions on Sensor Networks, 2009, 5(1): 1-39
- [5] Shao Xing, Wang Cui-Xiang, Rao Yuan. Research on cross layer network coding aware energy efficient routing for wireless sensor network. Acta Electronica Sinica, 2015, 43(12):

2484-2490(in Chinese)

(邵星,王翠香,饶元.基于跨层网络编码感知的无线传感器 网络节能路由算法研究.电子学报,2015,43(12):2484-2490)

[6] Liu Tao, Li Tian-Rui, Tan Wen-Rong, Yin Feng. Distributed data sinking mechanism based on joint optimization in wireless sensor networks. Journal on Communications, 2015, 36(7): 18-30(in Chinese)

(刘韬,李天瑞,谈文蓉,殷锋.基于分布式与联合优化的无 线传感器网络数据汇聚机制.通信学报,2015,36(7):18-30)

- [7] Shah M, Grabocka J, Schilling N, et al. Learning DTWshapelets for time-series classification//Proceedings of the IKDD Conference on Data Science. Pune, India, 2016; 1-8
- [8] Ferjani A A, Liouane N, Kacem I. Task allocation for wireless sensor network using logic gate-based evolutionary algorithm//Proceedings of the CoDIT'16. Saint Julian's, Malta, 2016: 654-658
- [9] Sun Li-Juan, Wei Jing, Guo Jian, et al. Node scheduling algorithm for heterogeneous wireless sensor networks. Acta Electronica Sinica, 2014, 42(10): 1907-1912(in Chinese) (孙力娟,魏静,郭剑等. 面向异构无线传感器网络的节点调 度算法. 电子学报, 2014, 42(10): 1907-1912)
- [10] Wei Z, Keong N G W. Prolonging lifespan of sensor networks using redundant nodes. Ad Hoc and Sensor Wireless Networks, 2013, 19(1): 1-19
- [11] Latif K, Javaid N, Saqib M N, et al. Energy consumption model for density controlled divide-and-rule cheme forenergy efficient routing in wireless sensor networks. International Journal of Ad Hoc and Ubiquitous Computing, 2016, 21(2): 130-139
- [12] Nuruzzaman M T, Ferng H W. A low energy consumption routing protocol for mobile sensor networks with a pathconstrained mobile sink//Proceedings of the 2016 IEEE International Conference on Communications. Kuala Lumpur, Malaysia, 2016: 1-6
- [13] Zhao M, Yang Y. Bounded relay hop mobile data gathering in wireless sensor networks. IEEE Transactions on Computers, 2010, 61(2): 373-382
- [14] Restuccia F, Das S K. Optimizing the lifetime of sensor networks with uncontrollable mobile sinks and QoS constraints. ACM Transactions on Sensor Networks, 2016, 12(1): 1-31
- [15] Habibi J, Aghdam A G, Ghrayeb A. A framework for evaluating the best achievable performance by distributed lifetime-efficient routing schemes in wireless sensor networks. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2015, 14(6): 3231-3246
- [16] Berber S, Fang S. Systems and methods for power efficient data communications in wireless sensor networks. Auckland, NZ2012/000030, 2012
- [17] Zhu Y, Xu J, Li E, Xu L. Energy-efficient reliable data gathering scheme based on Enhanced Reed-Solomon code for wireless sensor networks//Proceedings of the International Conference on Smart Computing. Hong Kong, China, 2014: 275-280
- [18] Francois F, Wang N, Moessner K, Georgoulas S. Optimizing link sleeping reconfigurations in ISP networks with off-peak time failure protection. IEEE Transactions on Network and Service Management, 2013, 10(2): 176-188
- [19] Liu J, Xu H, Zhou A. Beamforming design for energy efficiency maximization in miso channels. The Institute of Electronics, Information and Communication Engineers, 2016, E99. B(5): 1189-1195

- Yazdanpanah M, Assi C, Shayan Y. Optimal joint routing and scheduling in wireless mesh networks with smart antennas //Proceeding of the 11th IEEE International Symposium on "a World of Wireless Mobile and Multimedia Networks" (WOWMOM). Montreal, Canada, 2010: 1-7
- [21] Shafigh A S, Lorenzo B, Glisic S, et al. A framework for dynamic network architecture and topology optimization. Transactions on Networking, 2016, 24(2): 717-730
- [22] Tian Y, Boangoat J, Ekici E, et al. Real-time task mapping and scheduling for collaborative in-network processing in DVS-enabled wireless sensor networks//Proceedings of the 20th International Conference on Parallel and Distributed Processing. Rhodes Island, Greece, 2006: 25
- [23] Liu Dan, Zhou Qian, Zhang Zhi, Liu Baoling. Cluster-based energy-efficient transmission using a new hybrid compressed sensing in WSN//Proceedings of the INFOCOM WKSHPS. San Francisco, USA, 2016; 372-376
- [24] Liu Anfeng, Jin Xin, Cui Guohua, Chen Zhigang. Deployment guidelines for achieving maximum lifetime and avoiding energy holes in sensor network. Information Sciences, 2013, 230(1): 197-226
- [25] Halder S, DasBit S. Design of a probability density function targeting energy-efficient node deployment in wireless sensor networks. IEEE Transactions on Network and Service Management, 2014, 11(2): 204-219
- [26] Yan J, Zhou M, Ding Z. Recent advances in energy-efficient routing protocols for wireless sensor networks: A review. IEEE Access, 2016, 10(4): 5673-5686
- [27] Jabbar S, Minhas A A, Rashid T, Rho S. Heuristic approach for stagnation free energy aware routing in wireless sensor networks. Ad Hoc & Sensor Wireless Networks, 2016, 31(2): 21-45
- [28] Zhou Z, Du C, Shu L, Hancke G. An energy-balanced heuristic for mobile sink scheduling in hybrid WSNs. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2016, 12(1): 28-40
- [29] Imon S K A, Khan A, Francesco M D, Das S K. Energyefficient randomized switching for maximizing lifetime in treebased wireless sensor networks. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2015, 23(5): 1401-1415
- [30] Laouid A, Dahmani A, Bounceur A, et al. A distributed multi-path routing algorithm to balance energy consumption in wireless sensor networks. Ad Hoc Networks, 2017, 64: 53-64
- [31] Hu Xiaoqing, Hu Yu Hen, Xu Bugong. Energy-balanced scheduling for target tracking in wireless sensor networks. ACM Transactions on Sensor Networks, 2014, 11(1): 1-29
- [32] Alhalafi A, Sboui L, Naous R, Shihada B. gTBS: A green task-based sensing for energy efficient wireless sensor networks //Proceedings of the INFOCOM WKSHPS. San Francisco, USA, 2016: 136-143
- [33] Liu A F, Jin X, Cui G H, Chen Z G. Deployment guidelines for achieving maximum lifetime and avoiding energy holes in sensor network. Information Sciences, 2013, 230(1): 197-226
- [34] Liu An-Feng, Ren Ju, Xu Juan, et al. Analysis and avoidance of energy hole problem in heterogeneous wireless sensor networks. Journal of Software, 2012, 23(9): 2438-2448(in Chinese)

(刘安丰,任炬,徐娟等.异构传感器网络能量空洞分析与避 免研究.软件学报,2012,23(9):2438-2448)

[35] Halde S, Bit S D. Enhancement of wireless sensor network lifetime by deploying heterogeneous nodes. Journal of Network and Computer Applications, 2014, 38(1): 106-124 [36] Fan Gao-Juan, Wang Ru-Chuan, Huang Hai-Ping, Sun Li-Juan. Tolerable coverage area based node scheduling algorithm in wireless sensor networks. Acta Electronica Sinica, 2011, 39(1): 89-94(in Chinese)

(凡高娟,王汝传,黄海平,孙力娟.基于容忍覆盖区域的无 线传感器网络节点调度算法.电子学报,2011,39(1):89-94)

- [37] Layout R F, Kit C C D. A true system-on-chip solution for
 2. 4-GHz IEEE 802. 15. 4 and ZigBee applications. USA: Texas Instruments, DATASHEET; SWRU191B, 2010
- [38] Shan Mengfan, Chen Guihai, Luo Dijun. Building maximum lifetime shortest path data aggregation trees in wireless sensor networks. ACM Transactions on Sensor Networks, 2014, 11(1): 1-24
- [39] Applegate D, Cohen E. Making intra-domain routing robust to changing and uncertain traffic demands. Understanding fundamental tradeoffs//Proceedings of the ACM SIGCOMM. Karlsruhe, Germany, 2003. 313-324
- [40] Madan R, Cui S, Lall S, Goldsmith A. Cross-layer design for lifetime maximization in interference-limited wireless sensor networks//Proceedings of the 24th IEEE Conference on Computer Communications (INFOCOM). Miami, USA, 2005: 1964-1975



MA Dong-Chao, born in 1980, Ph. D., associate professor. His current research interests include the next generation network, WSN, embedded system.

- [41] Hellman K, Colagrosso M. Investigating a wireless sensor network optimal lifetime solution for linear topologies. Journal of Interconnection Networks, 2006, 7(1): 91-99
- [42] Candes E J, Tao T. Decoding by linear programming. IEEE Transactions on Information Theory, 2005, 51(12): 4203-4215
- [43] Bandeira A S, Dobriban E, Mixon D G, Sawin W F. Certifying the restricted isometry property is hard. IEEE Transactions on Information Theory, 2013, 59(2): 3448-3450
- [44] Candès E J, Wakin M B, Boyd S P. Enhancing sparsity by reweighted l₁ minimization. Journal of Fourier Analysis &-Applications, 2007, 14(5): 877-905
- [45] Xiao Rong, Chen Wen-Long, Sun Bo. Light weight and tree-based forwarding model in IPv6 IoT subnet. Journal of Software, 2014, 25(8): 1729-1742(in Chinese)
 (肖融,陈文龙,孙波. 面向 IPv6 物联子网的轻量级树型转 发模型. 软件学报, 2014, 25(8): 1729-1742)
- [46] Chen Wenlong, Zheng Zhe, Xiao Rong, et al. HRVN: A highly reliable forwarding model based on virtual nodes in node-intensive WSNs. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2015, 11(3): 1-12

SUN Xing-Guo, born in 1991, M.S. candidate. His main interest is WSN.

MA Li, born in 1968, professor. His main interests include WSN, Internet of Things, high performance computing technology.

Background

In recent years, wireless sensor network has become a research hotspot. WSN has the characteristics of limited nodes volume, limited power and bad application environment, therefore how to prolong network lifetime greatly is becoming one of the most urgent and important problems in research field of WSN. This problem has received the widely attention of academia and industry. According to technical characteristics, related works both here and abroad can be divided into several categories, such as energy-hole avoidance, energy efficient routing and mobile Sink. The ideas of these studies to prolong network lifetime can be summarized as follows: power consumption balancing, sleep scheduling and reduction of routing hops. Each of them has its advantage, but there are also some degrees of limitations. There are two main points: lack of adaptability and flexibility. The first point means that lack of adaptability to multiple lifetime standards. The death of the first node is often used as the end of network, but there are some other standards such as regarding the lifetime as the time span from all nodes joining the network to a certain percent of them running out of energy. How to prolong lifetime with different standards is less studied. The second point is lack of flexibility for different application scenarios, for example, reliability and lifetime indicators cannot be controlled and adjusted.

In view of the above deficiencies, we studied the characteristics of data sending and receiving on the mainstream sensor hardware which widely used in WSNs. A theoretical model RES-WSN with adjustable reliability and power consumption is proposed. It can also be adjusted for multiple lifetime standards. This model provides a method for network deployment and management to change the network performance dynamically. This model can be approximated to a convex optimization model, so the computational complexity is relatively low. The green factor parameter is provided as an adjustment method, and the deployment scheme based on RPL protocol is realized. The experimental results show that the reliability is improved, and power consumption reduced, also the network lifetime is extended correspondingly.

This research belongs to the National Natural Science Foundation of China (No. 61300171) and the Beijing Natural Science Foundation (No. 4172019). In these projects, the main contribution is to solve the multi-objective energysaving optimization problems.